СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ





Научная статья

УДК 624.011.1

https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-27-33

Напряженно-деформированное состояние несимметричной трехслойной балки

Х.М. Муселемов ✉**, А.И. Булгаков**, **Д.У. Муселемов**

Дагестанский государственный технический университет, г. Махачкала, Российская Федерация

✉ hairulla213@mail.ru

Аннотация

Введение. Трехслойная конструкция, имея небольшой вес, обладает достаточной жесткостью и прочностью для восприятия разных силовых и физических воздействий как статического, так и динамического характера. Комбинируя материалы и толщины несущих слоев и заполнителя можно добиться нужных физико-механических свойств трехслойной конструкции. В этой связи в данной работе рассматривается напряженно-деформированное состояние трехслойной балки с различной толщиной несущих слоев и высотой заполнителя.

Материал и методы. Изложен расчет трехслойной балки по известной теории расчета. В качестве примера рассматривалась трехслойная балка длиной 70 см, ее ширина менялась в зависимости от размера грани шестигранной ячейки заполнителя. Толщина несущих слоев варьировалась от 1 до 1,5 мм, толщина заполнителя — от 0,12 до 0,30 мм. Несущие слои изготавливались из алюминия АМГ2-Н, а сотовый шестигранный заполнитель — из сплава алюминия Д16-АТ.

Результаты исследования. На основании полученных данных были построены графики зависимости изменения напряжений и деформаций (прогибов) от распределенной нагрузки для каждого испытанного образца. Графические зависимости приведены для симметричной и несимметричной трехслойной балки.

Обсуждение и заключение. Полученные теоретические данные по деформациям (прогибам) и напряжениям позволили определить эффективную комбинацию несущих слоев, при которой трехслойная балка становится эффективной. На основе анализа этих данных были сделаны выводы, характеризующие повышения эффективности трехслойной балки.

Ключевые слова: несущий слой, заполнитель, напряжение, деформации, алюминий, трехслойная балка, конструктивная схема, распределенная нагрузка.

Для цитирования. Муселемов Х.М., Булгаков А.И., Муселемов Д.У. Напряженно-деформированное состояние несимметричной трехслойной балки. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий.* 2023;2(4):27–33. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-27-33

Original article

Stress-Strain State of an Unsymmetrical Three-Layer Beam

Khairulla M. Muselemov ✉**, Aleksander I. Bulgakov**, **Dzhabrail U. Muselemov**

Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russian Federation

✉ hairulla213@mail.ru

Abstract

Introduction. A three-layer structure, though having a small weight, possesses enough rigidity and strength to withstand various force and physical impacts of both static and dynamic nature. By altering the combination of materials and thicknesses of the loadbearing layers and the core, it is possible to achieve the desired physical and mechanical properties of a three-layer structure. In this regard, this paper investigates the stress-strain state of a three-layer beam of different thickness of loadbearing layers and height of the core.

Materials and Methods. The three-layer beam design based on the well-known calculation methodology is presented. A three-layer 70 cm long beam was examined as an example, its width was altered depending on the face size of the hexagonal cell of the core. The thickness of loadbearing layers was altered from 1 to 1.5 mm and the thickness of the core from 0.12 to 0.30 mm. The loadbearing layers were made of the AMG2-H (АМГ2-Н) aluminium alloy, and the hexagonal honeycomb core – of the D16-AT (Д16-АТ) aluminium alloy.
Results. Based on the obtained data, the graphs of the stresses and strains (deflections) alteration dependence on the distributed load were plotted for each of the tested specimens. The graphical dependences were given for the symmetrical and unsymmetrical three-layer beams.
Discussion and Conclusion. The obtained theoretical data on deformations (deflections) and stresses allowed determining the efficient combination of the loadbearing layers, which would make a three-layer beam efficient. Based on the analysis of this data, the conclusions on enhancing the three-layer beam efficiency were made.

Keywords: loadbearing layer, core, stress, deformations, aluminum, three-layer beam, structural layout, distributed load.

For citation. Muselemov KhM, Bulgakov AI, Muselemov DU. Stress-Strain State of an Unsymmetrical Three-Layer Beam. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning.* 2023;2(4):27–33.
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2023-2-4-27-33

Введение. Повышение эффективности современного строительства связано с реализацией новых конструктивно-технологических решений. Одним из важных направлений в этой сфере является создание сборных несущих покрытий зданий, эффективных не только по требованиям прочности и жесткости, но и по скорости возведения, материальным затратам и т.д. Эффективное воплощение в конструкциях этих качеств в значительной мере зависит от того, насколько принятое решение отражает в себе влияние многочисленных требований и иных определяющих факторов, отвечающих основным этапам создания конструкции: расчету, проектированию, экспериментальной обработке, технологии производства.

В настоящее время, как известно, во всем мире нашли широкое применение легкие слоистые, в частности, трехслойные конструкции [2–6], рациональное применение которых позволяет существенно снизить материалоемкость, трудоемкость изготовления, монтажа зданий, а также обеспечить высокую эффективность строительства. Трехслойные конструкции, представляющие собой композицию из двух тонких и прочных наружных слоев (обшивок) и склеенного или спаянного с ними легкого среднего слоя (заполнителя), — прогрессивный вид ограждающих элементов современных зданий. В самой идее трехслойных конструкций заложена возможность существенного улучшения характеристик удельной прочности и жесткости. Благодаря целесообразному выбору и составу отдельных слоев могут быть созданы трехслойные конструкции с отличными статическими и конструктивными свойствами.

Материалы и методы. Несущие слои изготавливаются из алюминия АМГ2-Н, а сотовый заполнитель — из сплава алюминия Д16-АТ. Длина рассматриваемой балки составляет 70 см, ширина меняется в зависимости от размера грани заполнителя и количества ячеек в ряду. Для расчета трехслойной балки необходимо знать приведенные характеристики сотовых заполнителей. Эти данные приведены в статье [7] и определены по методике, изложенной в работах [1, 8–10]. Толщина несущих слоев меняется в пределе $t_{1,2}$ = (0,1 ÷ 0,15) см. Индексы 1 и 2 относятся к нижнему и верхнему несущему слою, соответственно. Усилие q, прикладываемое к верхнему несущему слою находится в пределе от 0,01 до 0,03 МПа. Балка нагружена нагрузкой q, равномерно распределенной по поверхности. На рис. 1 показана конструктивная схема трехслойной балки.

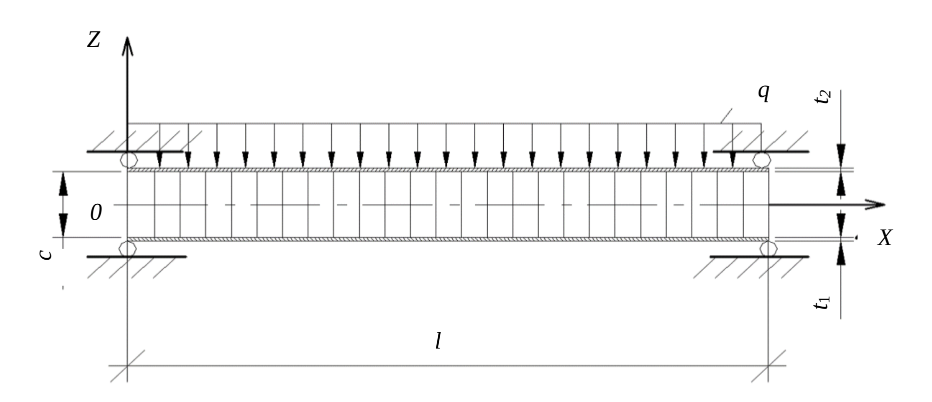


Рис. 1. Конструктивная схема трехслойной шарнирно опертой балки, нагруженной усилием q, равномерно распределенным по поверхности

Результаты исследования. Расчет проводился с целью определения прогибов и максимальных нормальных напряжений в верхнем несущем слое в середине пролета для шарнирно опертых трехслойных балок с учетом принятых форм.

Расчет трехслойных балок производился по методике, изложенной в книге Кобелева В.Н. [1]:

1. Максимальные нормальные напряжения в верхнем несущем слое равны:

$$\sigma_{12} = \frac{q \cdot \overline{B}_2}{2 \cdot B_{mp} \cdot (h_2 - h_1)^2} \cdot \left(\frac{c \cdot B_{mp}}{G_{133}} + \frac{l^2}{8} \right) - \frac{q}{h_2 - h_1} \cdot \frac{c \cdot B_{mp}}{t_1 \cdot G_{133}}.$$

2. Прогиб на расстоянии x от опоры равен:

$$W = \frac{q \cdot x}{2 \cdot B_{\text{тр}} \cdot (h_2 - h_1)^2} \cdot \left[1 \cdot \left(\frac{c \cdot B_{\text{тр}}}{G_{133}} + \frac{l^2}{2} \right) - \frac{c \cdot B_{\text{тр}}}{G_{133}} \cdot x - \frac{l \cdot x^2}{6} + \frac{x^3}{12} \right].$$

3. Максимальный прогиб в середине пролета $x = l/2$ равен:

$$W_{\max} = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot B_{mp} \cdot (h_2 - h_1)^2} \cdot \left(\frac{c \cdot B_{mp}}{G_{133}} + \frac{5 \cdot l^2}{48} \right);$$

где $\overline{B}_2 = \dfrac{2 \cdot B_{mp} \cdot (h_2 - h_1) + t_2 \cdot B_2}{t_2}$; $B_{mp} = \dfrac{B_1 \cdot B_2}{B_1 + B_2} = \dfrac{B^2}{2 \cdot B}$; $B_1 = \dfrac{E_1 \cdot t_1}{1 - \gamma_1^2}$; $B_2 = \dfrac{E_2 \cdot t_2}{1 - \gamma_2^2}$;

$h_1 = t_1 \cdot (1 + \zeta_1)/2 = 3{,}05\text{см}$; $h_2 = -t_2 \cdot (1 + \zeta_2)/2 = -3{,}05\text{см}$; $\zeta_1 = \zeta_2 = \dfrac{c}{t_{1,2}}$; $G_{133} = 0{,}879 \cdot \frac{t_{\text{ст}}}{r} \cdot G_{\text{мз}}$;

G_{133} — приведенный модуль сдвига в плоскости $x0z$; $G_{\text{мз}}$ = 270 000 кгс/см^2 — модуль сдвига заполнителя; B — жесткость стенки заполнителя.

Расчет производим для всех вариантов балок. Результаты расчета даны на графиках (рис. 2–5).

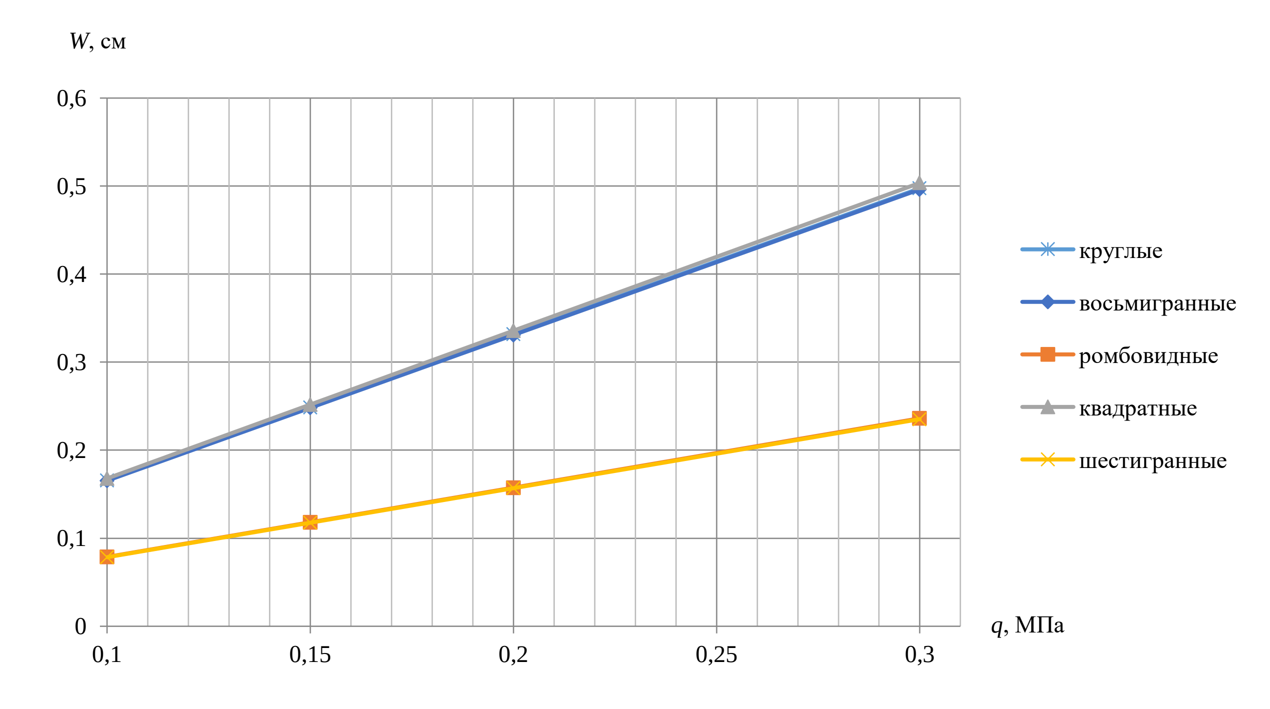


Рис. 2. Прогибы несимметричной трехслойной балки при шарнирном опирании концов в зависимости от q, для различных форм дискретного заполнителя при толщине несущих слоев t_1 = 0,10 см; t_2 = 0,15 см

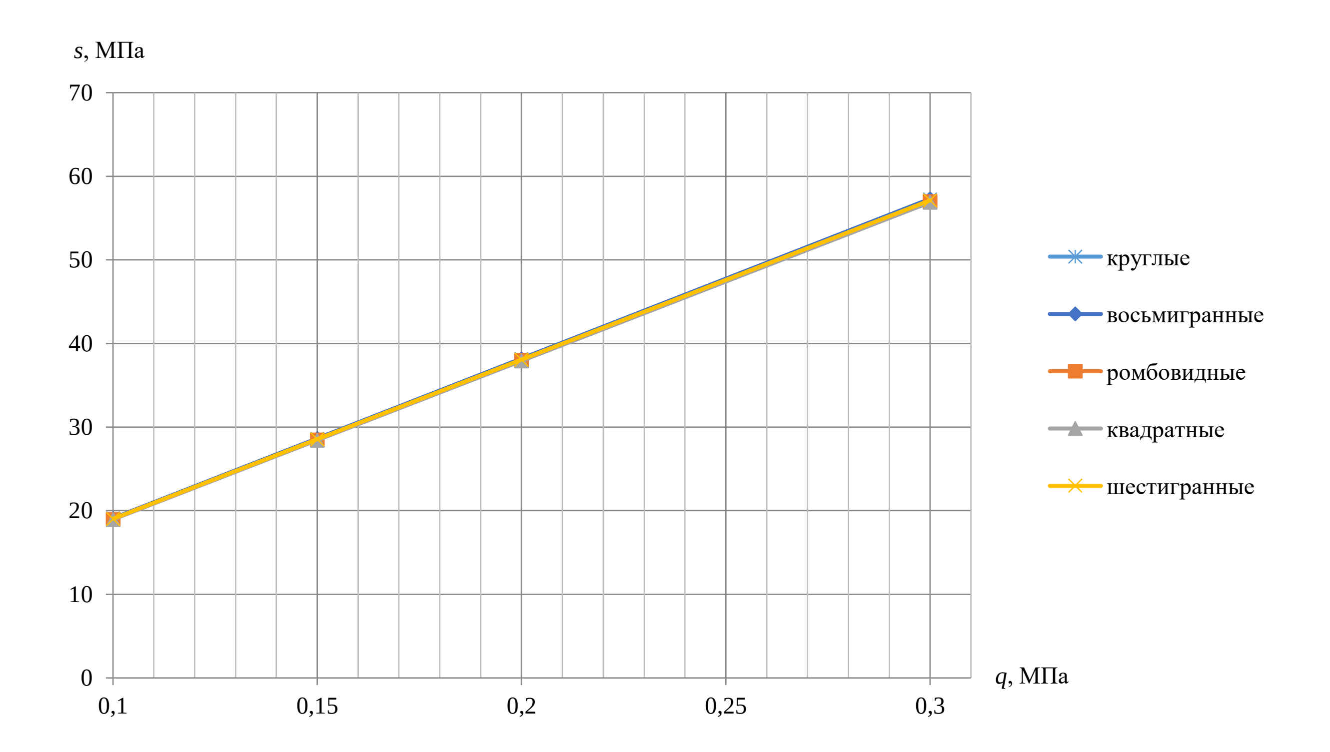


Рис. 3. Напряжения в несимметричной трехслойной балки при шарнирном опирании концов в зависимости от q, для различных форм дискретного заполнителя при толщине несущих слоев $t_1 = 0{,}10$ см; $t_2 = 0{,}15$ см

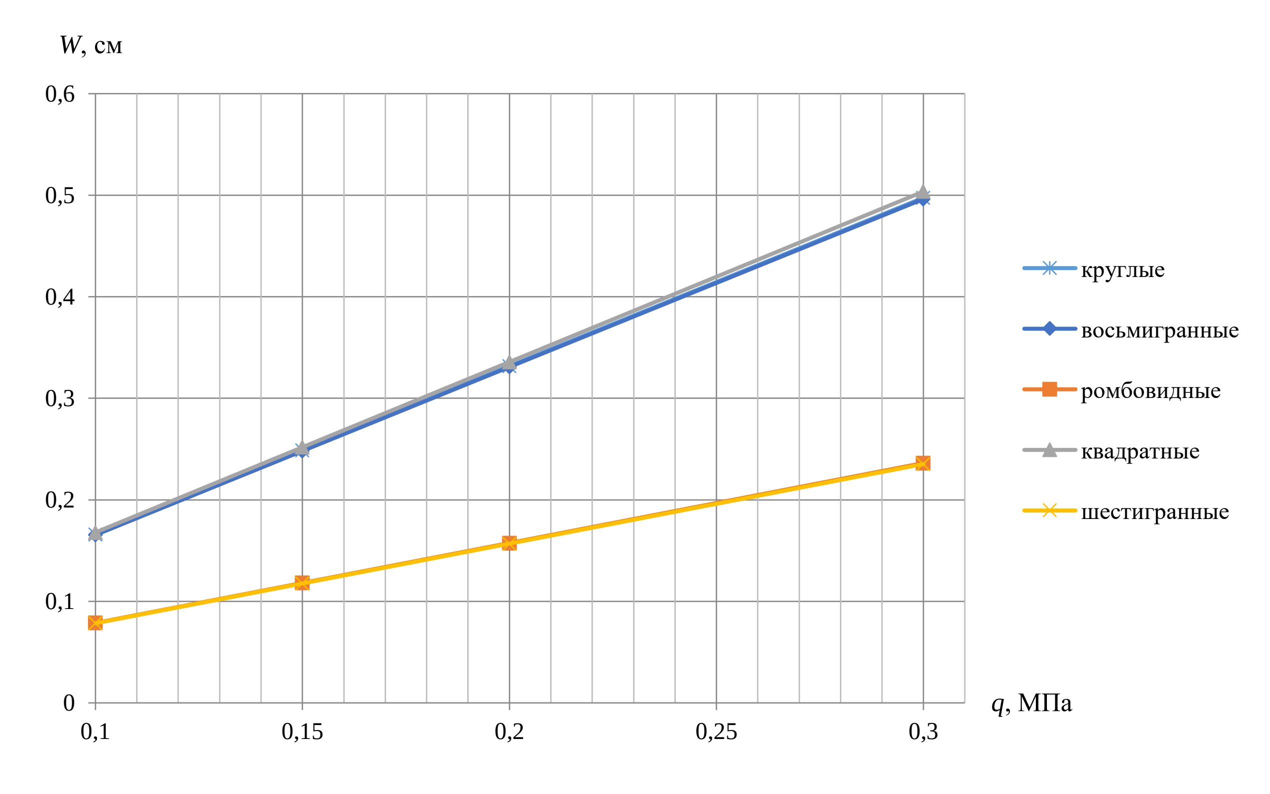


Рис. 4. Прогибы несимметричной трехслойной балки при шарнирном опирании концов в зависимости от q, для различных форм дискретного заполнителя при толщине несущих слоев $t_1 = 0{,}15$ см; $t_2 = 0{,}10$ см

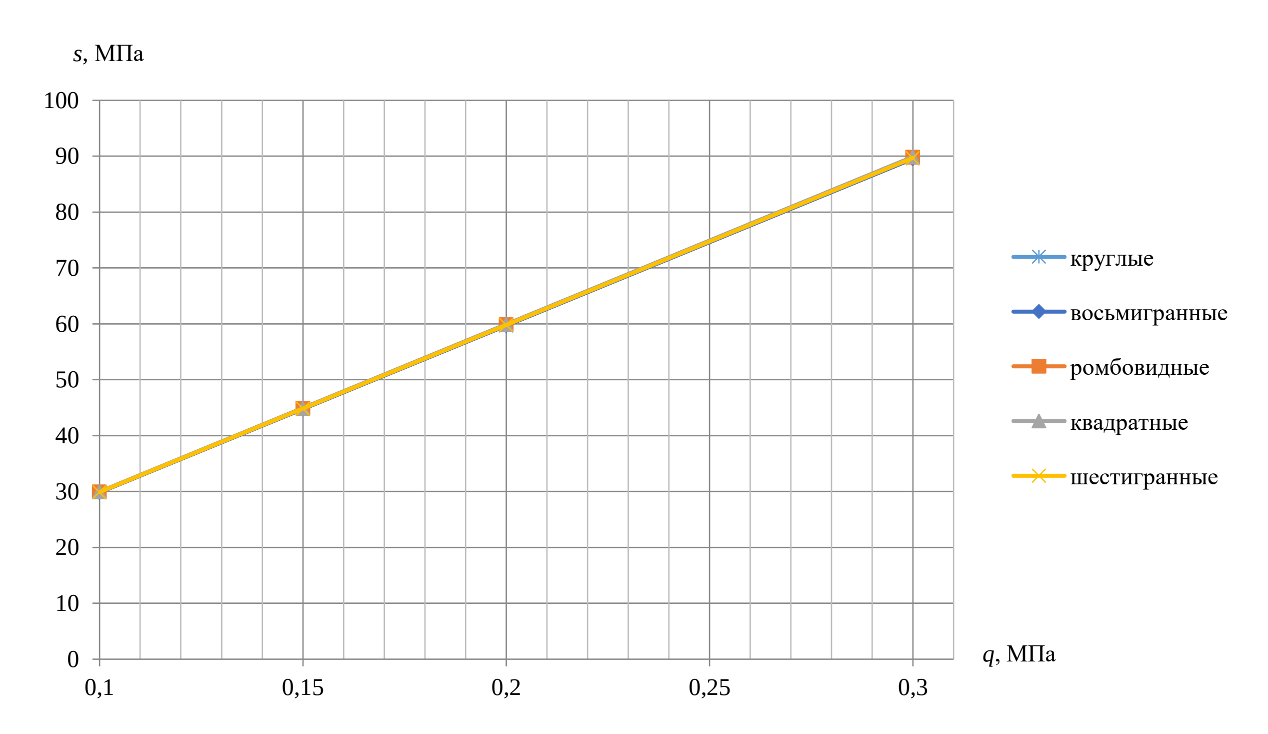


Рис. 5. Напряжения в несимметричной трехслойной балки при шарнирном опирании концов в зависимости от q, для различных форм дискретного заполнителя при толщине несущих слоев $t_1 = 0{,}15$ см; $t_2 = 0{,}10$ см

Обсуждение и заключения. Сравнение графиков напряжений и прогибов в зависимости от толщины несущих слоев показало, что при увеличении толщины верхнего несущего слоя с 0,1 см до 0,15 см для шарнирно опертой несимметричной балки прогибы уменьшаются на 17,35 %, напряжения уменьшаются на 35,97 %, а при увеличении толщины нижнего несущего слоя с 0,1 см до 0,15 см для шарнирно опертой несимметричной балки прогибы также уменьшаются на 17,35 %, напряжения увеличиваются на 0,58 %. Как видно из результатов, изменение толщины несущих слоев как верхнего, так и нижнего, одинаково влияют на деформативность балки — прогибы уменьшаются. А на напряжения изменение толщины несущих слоев влияет не одинаково: при увеличении толщины верхнего несущего слоя балка становится эффективнее, а при увеличении толщины нижнего несущего слоя напряжения возрастают.

Список литературы

1. Кобелев В.Н., Коварский Л.М., Тимофеев С.И. *Расчет трехслойных конструкций*. Москва: Машиностроение; 1984. 304 с.

2. Двоеглазов И.В., Халиулин В.И. К вопросу проведения экспериментальных исследований прочности складчатых заполнителей типа z-гофр на поперечное сжатие. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета).* 2012;11(5–2):275–280. https://doi.org/10.18287/2541-7533-2012-0-5-2(36)-275-281

3.Иванов А.А., Гофин М.Я. *Механика сотовых заполнителей*. Москва: Московский лесотехнический институт; 1989. 315 с.

4.Ильдияров Е.В. Экспериментально-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния трехслойной кровельной панели с ортотропным средним слоем. *Строительная механика и расчет сооружений.* 2011;(6):11–15.

5. Панин В.Ф., Гладков Ю.А. *Конструкции с заполнителем*. Москва: Машиностроение; 1991. С. 15–60.

6. Паймушин В.Н. Теория устойчивости трехслойных пластин и оболочек (этапы развития, современное состояние и направления дальнейших исследований). *Известия РАН, Механика твердого тела*. 2001;(2):148–162. URL: https://mtt.ipmnet.ru/ru/Issues/2001/2/148 (дата обращения: 04.09.2023).

7. Вишталов Р.И., Муселемов Х.М., Устарханов О.М. Определение приведенных характеристик сотовых заполнителей различных форм. *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки.* 2016;42(3):155–166. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2016-42-3-155-166

8. Устарханов О.М., Алибеков М.С., Устарханов Т.О. Экспериментальное исследование прочности конического заполнителя для трехслойных конструкций. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение.* 2014;(9):54–59. https://doi.org/10.18698/0536-1044-2014-9-54-59

9. Устарханов О.М., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О. Экспериментальные исследования трехслойных балок с пирамидальным дискретным заполнителем. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение.* 2016;(2):59–64. https://doi.org/10.18698/0536-1044-2016-2-59-64

10. Устарханов О.М., Кобелев В.Н., Кобелев В.В., Абросимов Н.А. Анализ экспериментального исследования трехслойных балок с металлическим сотовым заполнителем и композиционными несущими слоями. В: *Сборник Международной научно-технической конференции «Современные научно-технические проблемы гражданской авиации»*. Москва: МГТУГА; 1999. С. 32–33.

References

1. Kobelev VN, Kovarskiy LM, Timofeev SI. *Calculation of Three-Layer Structures*. Moscow: Mashinostroenie; 1984. 304 p. (In Russ.).

2. Dvoeglazov IV, Khaliulin VI. On the Development of Experimental Methods in Research of Folded Core Type Z-Crimp on the Transverse Compressive Test Strength. *VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2012;11(5–2):275–280. https://doi.org/10.18287/2541-7533-2012-0-5-2(36)-275-281 (In Russ.).

3. Ivanov AA, Gofin MYa. *Mechanics of the Honeycomb Cores*. Moscow: Moscow Forest Engineering Institute; 1989. 315 p. (In Russ.).

4. ldiyarov EV. Experimental-Theoretical Studies of Stress-Strain State of Three-Layer Roof Panel with Orthotropic Middle Layer. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions.* 2011;(6):11–15. (In Russ.).

5. Panin VF, Gladkov YuA. *Constructions with the Core*. Moscow: Mashinostroenie; 1991. P. 15–60. (In Russ.).

6. Paimushin VN. Theory of Stability of Three-Layer Plates and Shells (Stages of Development, Present State and Directions of Further Research). *Mechanics of Solids. A Journal of Russian Academy of Sciences.* 2001;(2):148–162. URL: https://mtt.ipmnet.ru/ru/Issues/2001/2/148 (accessed: 04.09.2023). (In Russ.).

7. Vishtalov RI, Muselemov KhM, Ustarkhanov OM. The Definition of the Given Characteristics of Honeycomb Fillers of the Different Shapes. *Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences.* 2016;42(3):155–166. https://doi.org/10.21822/2073-6185-2016-42-3-155-166 (In Russ.).

8. Ustarkhanov OM, Alibekov MS, Ustarkhanov TO. Experimental Study of the Strength of a Conical Core in Sandwich Structures. *Bauman Moscow State Technical University (BMSTU) Journal of Mechanical Engineering.* 2014;(9):54–59. https://doi.org/10.18698/0536-1044-2014-9-54-59 (In Russ.).

9. Ustarkhanov OM, Muselemov HM, Ustarkhanov TO. An Experimental Study of Three-Layer Beams with Discrete Pyramidal Filler. *Bauman Moscow State Technical University (BMSTU) Journal of Mechanical Engineering*. 2016;(2):59–64. https://doi.org/10.18698/0536-1044-2016-2-59-64 (In Russ.).

10. Ustarkhanov OM, Kobelev VN, Kobelev VV, Abrosimov NA. Analysis of Experimental Study of Three-Layer Beams with Metal Honeycomb Core and Composite Loadbearing Layers. In: *Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Modern Scientific and Technical Problems of Civil Aviation"*. Moscow: Moscow State Technical University of Civil Aviation (MGTUGA) Publ.; 1999. P. 32–33. (In Russ.).

Поступила в редакцию 12.09.2023
Поступила после рецензирования 22.09.2023
Принята к публикации 06.10.2023

Об авторах:

Муселемов Хайрулла Магомедмурадович, доцент кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения» Дагестанского государственного технического университета (367015, РФ, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70), кандидат технических наук, доцент, ORCID, hairulla213@mail.ru

Булгаков Александр Исакович, доцент кафедры «Строительные конструкции и гидротехнические сооружения» Дагестанского государственного технического университета (367015, РФ, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70), доцент, ORCID, alexbild_58@mail.ru

Муселемов Джабраил Убайдуллаевич, студент 2-го курса специальности «Строительство уникальных зданий и сооружений» Дагестанского государственного технического университета (367015, РФ, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70), ORCID, muselemov19@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Муселемов Х.М. — формирование основной концепции, цели и задачи, научное руководство.

Булгаков А.И. — анализ результатов исследований, формирование выводов, исследования, корректировка выводов.

Муселемов Д.У. — проведение расчетов, подготовка текста.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 12.09.2023
Revised 22.09.2023
Accepted 06.10.2023

About the Authors:

Khairulla M. Muselemov, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Building Constructions and Hydraulic Structures Department, Dagestan State Technical University (70, I. Shamil Ave., Makhachkala, 367015, RF), ORCID, hairulla213@mail.ru

Aleksander I. Bulgakov, Associate Professor, Associate Professor of the Building Constructions and Hydraulic Structures Department, Dagestan State Technical University (70, I. Shamil Ave., Makhachkala, 367015, RF), ORCID, alexbild_58@mail.ru

Dzhabrail U. Muselemov, 2-nd Year Student of the Construction of Unique Buildings and Structures Major, Dagestan State Technical University (70, I. Shamil Ave., Makhachkala, 367015, RF), ORCID, muselemov19@mail.ru

Claimed contributorship:

Muselemov KhM — formulating the main concept, aim and objectives, scientific supervision.

Bulgakov AI — analysis of the research results, formulating the conclusions, experimental research, refining the conclusions.

Muselemov DU — making the calculations, preparing the text.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.